

AstroHUB

Úvod do astroinformatiky

Jak počítače zkoumají vesmír: Od prvního pixelu k
analýze velkých dat

AUTOR

David Pěkník

Datum vydání: 1. 10. 2026
Verze publikace: 1.0

www.astrohub.cz

OBSAH

Úvod a předmluva: Když se vesmír promění v data	4
---	---

ČÁST I: CO JE TO ASTROINFORMATIKA A JAK PRACUJÍ DALEKOHLEDY

Kapitola 1	Co je to astroinformatika a proč vznikla	6
1.1	Konec éry vizuálního pozorování: Proč astronomové tráví čas u monitoru	6
1.2	Data jako nová laboratoř: Od jednotlivých snímků k petabajtovým přehlídkám	6
1.3	Tři pilíře astroinformatiky: Astronomie, informatika a statistika	7
Kapitola 2	Anatomie digitálního astronomického snímku	8
2.1	Jak polovodičový čip promění světlo v čísla v paměti	8
2.2	Co je to pixel, bitová hloubka a dynamický rozsah	8
2.3	Proč jsou vědecké snímky černobílé a jak vznikají barvy	9
Kapitola 3	Formát FITS – Univerzální jazyk moderní astronomie	11
3.1	Proč by běžný obrázek zničil vědecká data	11
3.2	Anatomie FITS souboru: Hlavička a datový blok	12
3.3	Co všechno o snímku prozradí hlavička	12

ČÁST II: OČISTA DAT ANEB JAK ZÍSKAT ČISTÝ SIGNÁL Z VESMÍRU

Kapitola 4	Kročení šumu a kalibrace vědeckého obrazu	15
4.1	Proč každý senzor šumí: Zdroje nežádoucího signálu	15
4.2	Tři záchranné kruhy: Bias, Dark a Flat-field	15
4.3	Výsledná kalibrační rovnice	16
Kapitola 5	Kosmické záření a vady detektorů	17
5.1	Zbloudilé částice: Zásahy kosmického záření	17
5.2	Jak algoritmus L.A.Cosmic pozná částici od skutečné hvězdy	17
5.3	Mrtvé a horké pixely: Defektní masky	18

ČÁST III: POLOHA A MĚŘENÍ SVĚTLA NA OBLOZE

Kapitola 6	Kde na nebi vlastně jsme? (Úvod do astrometrie a WCS)	20
6.1	Souřadnice na nebeské klenbě: Rektascenze a Deklinace	20
6.2	Systém WCS: Most mezi pixely a oblohou	20
6.3	Plate Solving: Zázrak automatického rozpoznání oblohy	21
Kapitola 7	Měření jasu hvězd (Základy fotometrie)	22
7.1	Od počítání fotonů k astronomickým magnitudám	22
7.2	Aperturní fotometrie: Jak změřit světlo hvězdy na monitoru	22
7.3	PSF fotometrie: Když jsou hvězdy natlačeny na sebe	23
Kapitola 8	Hvězdná spektra: Čtení chemických vzkazů ze světla	24
8.1	Od duhového pruhu k jednorozměrnému vědeckému grafu	24
8.2	Čárový kód prvků: Jak poznat složení hvězdy na dálku	24
8.3	Dopplerův jev: Kosmický rychloměr	25

ČÁST IV: ČAS, PROMĚNNOST A HLEDÁNÍ NOVÝCH SVĚTŮ

Kapitola 9	Světelné křivky a proměnné jevy	27
9.1	Co nám prozradí světelná křivka	27
9.2	Problém astronomického vzorkování: Mezery v datech	27
Kapitola 10	Objevování exoplanet pomocí analýzy dat	29

10.1	Tranzitní metoda: Komár před reflektorem	29
10.2	Fázování světelné křivky (Phase Folding)	29
10.3	Hrdinové lovu planet: Družice Kepler a TESS	30

ČÁST V: JAK POČÍTAČ PRACUJE S NEJISTOTOU (STATISTIKA JEDNODUŠE)

Kapitola 11	Proč žádné měření v astronomii není přesné (Teorie chyb)	32
11.1	Každé číslo potřebuje svou nejistotu	32
11.2	Dva králové chyb: Gaussovo a Poissonovo rozdělení	32
Kapitola 12	Prokládání dat přímkou a křivkou (Lineární regrese)	34
12.1	Metoda nejmenších čtverců (Least Squares)	34
12.2	Co dělat s odlehlými body (Outliers)	34
12.3	Kritérium chí-kvadrát: Jak poznat dobrou shodu	35

ČÁST VI: UMĚLÁ INTELIGENCE, VIRTUÁLNÍ OBSERVATOŘE A PRAXE

Kapitola 13	Úvod do strojového učení pro astronomy	37
13.1	Co je to strojové učení lidsky a srozumitelně	37
13.2	Učení s učitelem a bez učitele	37
13.3	Hledání kosmické jehly v kupce sena: Detekce anomálií	38
Kapitola 14	Virtuální observatoře a astronomické databáze	39
14.1	Poklady na dosah ruky: Světová datová centra	39
14.2	Jak se ptát katalogů: Dotazovací jazyk ADQL	39
14.3	Aladin Sky Atlas: Vesmír na vašem monitoru	40
Kapitola 15	Praktické první krůčky v Pythonu	41
15.1	Zlatý standard: Ekosystém AstroPy	41
15.2	Úloha 1: Načtení a zobrazení FITS snímku	41
15.3	Úloha 2: Vykreslení tranzitu exoplanety	42

PŘÍLOHY A REFERENČNÍ PŘÍRUČKY

Dodatek A	Malý průvodce astronomickými jednotkami a pojmy	44
Dodatek B	Seznam nejlepších volně dostupných nástrojů pro astroinformatiku	45
Dodatek C	Deset velkých astronomických objevů, které umožnila analýza dat	46
Dodatek D	Encyklopedický glosář základních pojmů astroinformatiky	47

Úvod a předmluva: Když se vesmír promění v data

Vítejte u knihy, která otevírá dveře do jedné z nejvíce vzrušujících a nejrychleji se rozvíjejících vědních disciplín 21. století – **astroinformatiky**.

Po celá tisíciletí byla astronomie vědou lidského oka a papírového deníku. Od starověkých kněží v Mezopotámii přes Galilea Galileiho hledícího jednoduchým tubusem na měsíce Jupitera až po astronomy 19. století sedící v mrazivých nocích pod kupolemi observatoří: astronom musel stát přímo u dalekohledu. Pozorování znamenalo fyzickou přítomnost člověka, překreslování mlhavých obláčků do skicáře a později vyvolávání skleněných fotografických desek v temné komoře plné toxických chemikálií.

V posledních třech desetiletích však došlo k tiché, ale naprosto převratné revoluci. Astronomie se z pozorovací disciplíny stala **vědou o datech** (*Data Science*).

Dnešní profesionální astronom se už téměř nikdy nedívá do okuláru dalekohledu. Většina moderních vědeckých teleskopů dokonce žádný okulár ani nemá. Místo lidského oka zachycují fotony přicházející z hlubin vesmíru gigantické křemíkové čipy chlazené na teploty pod $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalekohledy na odlehlých vrcholcích chilských And, na sopkách na Havaji nebo na oběžné dráze miliony kilometrů od Země pracují autonomně. Každou noc chrlí terabajty číselných matic, spekter a tabulek, které optickými kabely a satelitními linkami putují do obřích serverových center.

Vesmír se pro nás stal gigantickou databází.

Pro koho je tato kniha určena?

Tato kniha vznikla pro každého, kdo miluje vesmír, ale zároveň chce nahlédnout pod kapotu moderní vědy. Nemusíte být vystudovaný matematik, programátor ani astrofyzik. Začneme od úplných základů:

- Vysvětlíme si, co je to vlastně astroinformatika a jak se světlo z daleké galaxie promění na pouhá čísla v paměti počítače.
- Podíváme se, jak astronomové odstraňují šum a jak ze zdánlivě poškozeného snímku získají čistý obraz.
- Ukážeme si, jak z pouhých několika čísel dokážeme změřit teplotu hvězdy, její chemické složení nebo odhalit planetu, kterou lidské oko nikdy přímo nespatří.
- Nahlédneme do světa umělé inteligence a strojového učení, které dnes pomáhají třídit miliardy galaxií.

Pojďme společně zjistit, jak počítače čtou vesmír.

Část I: Co je to astroinformatika a jak pracují dalekohledy

První část knihy vás seznámí se základními stavebními kameny digitální astronomie. Zjistíte, proč moderní astronomie musela opustit tradiční fotografii, jak fungují digitální senzory zachycující jednotlivé fotony a v jakém formátu se data z teleskopů ukládají a sdílejí napříč vědeckou komunitou.

Kapitola 1: Co je to astroinformatika a proč vznikla

V této úvodní kapitole položíme základy našeho porozumění. Podíváme se na to, jak se astronomie proměnila z romantického nočního bdění v moderní datovou disciplínu a co přesně obor astroinformatika zkoumá.

1.1 Konec éry vizuálního pozorování: Proč astronomové tráví čas u monitoru

Představte si astronomickou observatoř na počátku 20. století: na vrcholu hory Mount Wilson sedí astronom v těžkém vlněném kabátě, v ruce drží jemné šrouby dalekohledu a celé hodiny ručně koriguje pohon montáže, aby obraz vzdálené mlhoviny zůstal nehybný na fotografické emulzi. Každý takto získaný snímek byl unikátním uměleckým i technickým dílem. Byla v tom poezie, ale z pohledu moderní vědy to mělo obrovské limity:

1. **Lidské oko má krátkou paměť:** Lidské oko neakumuluje světlo. Pokud se díváte do okuláru na slabou galaxii, vaše sítnice vyhodnocuje signál v intervalech zlomků vteřiny. Co neuvidíte za desetinu vteřiny, neuvidíte ani za hodinu.
2. **Fotografická emulze zachytí jen zlomek fotonů:** Tradiční chemický fotografický film měl kvantovou účinnost kolem 1 až 2 %. To znamená, že z každých 100 fotonů, které z dalekého vesmíru dorazily na povrch desky, chemická reakce zaznamenala pouze jeden nebo dva. Zbytek byl nenávratně ztracen.
3. **Fotografie nebyla měřitelná přímo:** Zčernání fotografické desky nebylo lineární. Změřit přesně, o kolik je jedna hvězda jasnější než druhá, vyžadovalo zdlouhavé a nepřesné fotometrické měření hustoty zčernání pod mikroskopem.

Příchod polovodičových digitálních detektorů (CCD a CMOS) v 70. a 80. letech 20. století změnil vše. Křemíkový čip dokáže zaznamenat až 90 % všech dopadajících fotonů a navíc je ukládá jako přímá čísla. Z pozorování se stalo přímé měření.

1.2 Data jako nová laboratoř: Od jednotlivých snímků k petabajtovým přehlídkám

Druhým impulzem pro zrod astroinformatiky byla dramatická změna měřítka. Tradiční astronomie se zaměřovala na jeden konkrétní objekt – dalekohled mířil celou noc na jedinou hvězdu nebo

mlhovinu.

Moderní astronomie však stojí na **přehlídkách oblohy** (*Sky Surveys*). Speciálně navržené širokoúhlé teleskopy systematicky fotografují celou nebeskou klenbu znovu a znovu:

- **Sloan Digital Sky Survey (SDSS):** Přehlídka zahájená v roce 2000 vytvořila první podrobnou 3D mapu třetiny oblohy, zmapovala stovky milionů hvězd a galaxií a nashromáždila desítky terabajtů dat.
- **Družice Gaia (ESA):** Od roku 2013 měří přesné polohy, vzdálenosti a radiální rychlosti téměř dvou miliard hvězd v naší Galaxii. Výsledný katalog je největší astrometrickou databází v dějinách lidstva.
- **Observatoř Věry Rubinové (Vera C. Rubin Observatory / LSST):** Nejnovější obří přehlídkový dalekohled v Chile s 3,2 gigapixelovou kamerou vyprodukuje každou noc přibližně 20 terabajtů surových dat. Během své desetileté mise shromáždí více než 60 petabajtů snímků.

ZAJÍMAVOST

Co je to petabajt? 1 petabajt (PB) je 1 000 terabajtů neboli 1 000 000 gigabajtů. Kdybyste chtěli vytisknout 1 petabajt dat na běžný kancelářský papír, vzniklý sloupec by sahal až na Měsíc.

Je zřejmé, že takové množství informací nemůže žádný člověk ani tým vědců prohlížet ručně. Jediný způsob, jak v tomto oceánu dat najít novou planetu, vybuchující supernovu nebo nebezpečný asteroid, je nechat data analyzovat algoritmy a počítači.

1.3 Tři pilíře astroinformatiky: Astronomie, informatika a statistika

Astroinformatika není pouhým „používáním počítačů v astronomii“. Je to svébytný mezioborový vědní obor stojící na pevném trojúhelníku tří disciplín:

1. **Astrofyzika:** Poskytuje fyzikální teorii a kontext. Ví, co pozorované signály znamenají v reálném vesmíru (gravitace, elektromagnetické záření, termonukleární reakce, geometrie oběžných drah).
2. **Počítačové vědy (Informatika):** Dodávají nástroje pro ukládání, vyhledávání a efektivní zpracování gigantických objemů dat (databázové systémy, paralelní výpočty, architektury cloudových úložišť a optimalizovaný kód).
3. **Matematická statistika a strojové učení:** Tvoří mozek celého procesu. Poskytují matematické metody, jak v zašuměných měřeních odhalit reálné trendy, jak odhadnout chyby a jak naučit neuronové sítě samostatně klasifikovat miliony objektů.

Astroinformatik je tedy vědec moderní doby – rozumí fyzice noční oblohy, ale jeho hlavní laboratoří je kód, databáze a matematický model.

Kapitola 2: Anatomie digitálního astronomického snímku

Abychom pochopili, jak počítače zkoumají vesmír, musíme nejprve porozumět tomu, co to vlastně digitální astronomický snímek je. V této kapitole se podíváme na fyziku digitálního pixelu a vysvětlíme si, proč vědecké snímky fungují zcela jinak než fotky z vašeho chytrého telefonu.

2.1 Jak polovodičový čip promění světlo v čísla v paměti

Když se podíváte na monitor počítače na astronomický snímek vzdálené galaxie, nevidíte fotografii v klasickém smyslu. Vidíte dvourozměrnou tabulku čísel.

Každý digitální astronomický senzor (ať už v obřím teleskopu VLT na zemi, nebo na palubě vesmírného dalekohledu Jamese Webba) je tvořen křemíkovou destičkou rozdělenou do milionů miniaturních čtvercových buněk – **pixelů**.

Základem je **vnitřní fotoelektrický jev**:

1. Foton (světelné kvantum), který putoval vesmírem třeba 50 milionů let, proletí optikou dalekohledu a narazí do křemíkového krystalu v určitém pixelu.
2. Pokud má foton dostatečnou energii, vyrazí z valenčního pásu křemíku elektron do vodivostního pásu.
3. Tento uvolněný elektron je zachycen v elektrickém poli pixelu, které funguje jako mikroskopický „kbelík na elektrony“ (*potential well*).
4. Čím déle je závěrka dalekohledu otevřená a čím jasnější je pozorovaný objekt, tím více elektronů se v daném kbelíku nashromáždí.

Na konci expozice dojde k **vyčtení senzoru**. Elektronika postupně změří elektrický náboj v každém pixelu, převede ho na napětí a analogově–digitální převodník (ADC) přiřadí každému pixelu jedno celé číslo.

Výsledkem expozice tedy není žádný „obrázek“, ale obrovská obdélníková matice čísel, kde každé číslo udává, kolik fotonů do daného místa během expozice dopadlo.

2.2 Co je to pixel, bitová hloubka a dynamický rozsah

Běžná fotografie z mobilního telefonu používá barevný prostor, kde každý barevný kanál má **8bitovou hloubku**. To znamená, že jas každého bodu může nabývat pouze 256 různých hodnot

(od 0 do 255):

$$2^8 = 256$$

Pro zobrazení rodinné oslavy na displeji telefonu to bohatě stačí. Pro astronomii je to však naprosto nepoužitelné. Ve vesmíru se totiž setkávají extrémní kontrasty: zářící jádro galaxie může do senzoru poslat milionkrát více světla než její slaboučká vnější spirální ramena. Kdybychom použili 8 bitů, jádro by bylo zcela přepálené (bílá plocha s hodnotou 255) a slabá ramena by splynula s černým pozadím (hodnota 0).

Proto vědecké astronomické kamery pracují s **16bitovou nebo 32bitovou hloubkou**:

- **16 bitů:** Umožňuje rozlišit $2^{16} = 65\,536$ úrovní jasu (oproti pouhým 256 u 8bitového obrazu).
- **32 bitů (Single Precision Float):** Umožňuje ukládat reálná čísla s plovoucí řádovou čárkou s dynamickým rozsahem přesahujícím desítky řádů.

Díky vysoké bitové hloubce je v datech zachován jak nejslabší záchvěv světla vzdáleného plynového oblaku, tak zářící hvězda v popředí.

2.3 Proč jsou vědecké snímky černobílé a jak vznikají barvy

Mnoho lidí překvapí zjištění, že **žádný velký vědecký dalekohled na světě nefotí barevně**. Hubbleův teleskop, James Webb ani pozemní obří observatoře nemají na svých senzorech barevnou mozaiku (Bayerovu masku), jakou najdete v běžném fotoaparátu.

Důvody jsou ryze vědecké:

1. **Ztráta rozlišení:** V barevném čipu má každý pixel před sebou malý barevný filtr (červený, zelený nebo modrý). Tři čtvrtiny dopadajícího světla se tím zablokují a senzor ztrácí prostorové rozlišení i citlivost.
2. **Přesná vlnová délka:** Vědce málokdy zajímá obecná „červená“ nebo „zelená“. Potřebují izolovat světlo vyzařované konkrétními atomy – například čáru ionizovaného vodíku H-alfa ($H\alpha$, 656,3 nm) nebo dvakrát ionizovaného kyslíku [O III] (500,7 nm).

Astronom proto snímá oblohu jako sérii **černobílých monochromatických snímků přes různé optické filtry**.

Jak z nich vznikne slavná barevná fotografie?

- Snímek pořízený přes filtr propouštějící delší vlnové délky (např. červené světlo) přiřadíme v počítači do červeného kanálu (R).
- Snímek přes filtr středních vlnových délek do zeleného kanálu (G).
- Snímek přes filtr nejkratších vlnových délek do modrého kanálu (B).

Složením těchto tří číselných matic vznikne výsledný plnobarevný RGB obraz. Pokud filtry odpovídají viditelnému světlu, mluvíme o **přirozených barvách**. Pokud však dalekohled fotí v infračerveném oboru (jako James Webb), lidské oko by toto světlo vůbec nevidělo. Astronomové proto nejdelší infračervené vlnové délky namapují na červenou, střední na zelenou a nejkratší infračervené na modrou. Vznikne obraz v tzv. **reprezentativních barvách** (*False Colors*), který lidskému oku zviditelní fyzikální procesy skryté v neviditelné části spektra.

Kapitola 3: Formát FITS – Univerzální jazyk moderní astronomie

Pokud si stáhnete snímek z internetu, pravděpodobně bude mít příponu `.jpg` nebo `.png`. Pokud si však stáhnete vědecká data z archivu NASA, Hubbleova teleskopu nebo Evropské jižní observatoře, soubor bude končit příponou `.fits`. V této kapitole si vysvětlíme, co tento formát znamená a proč je srdcem celé astroinformatiky.

3.1 Proč by běžný obrázek zničil vědecká data

Běžné obrazové formáty vznikly pro lidské oči a pro co nejmenší velikost souboru. K tomu využívají **ztrátovou kompresi** (jako JPEG):

- Algoritmus JPEG vyhledává drobné barevné přechody, které lidské oko snadno přehlédne, a jednoduše je smaže.
- Jasové hodnoty jsou ořezány do 8 bitů (0 až 255).

Pro astrofyzika je ztrátová komprese katastrofou. Kdybyste uložili snímek galaxie do JPEG:

- Slabé fotonové signály na hranici šumu by kompresní algoritmus považoval za „šum“ a vyhladil by je.
- Všechny jemné informace o jasu hvězd by byly nenávratně zkresleny. Z takového snímku by již nikdy nebylo možné přesně změřit jasnost objektu ani spočítat fotony.

Proto astronomie potřebovala formát, který:

1. Uchovává data **naprosto bezztrátově** v původních fyzikálních hodnotách (jako celá čísla nebo 32bitová/64bitová desetinná čísla).
2. Je schopen nést neomezený počet dimenzí (2D snímky, 1D spektra, 3D datové krychle, vícerozměrné tabulky).
3. Je **platformně nezávislý** a otevřený – data pořízená v roce 1985 musí jít bez problémů otevřít i na moderním superpočítači v roce 2026.

Tímto formátem je **FITS** (*Flexible Image Transport System*), vyvinutý v roce 1981 a spravovaný Mezinárodní astronomickou unií (IAU). Jeho základním mottem je: „*Once FITS, always FITS*“ (Co bylo jednou uloženo ve FITS, musí být navždy čitelné).

3.2 Anatomie FITS souboru: Hlavička a datový blok

Formát FITS má geniálně jednoduchou a přehlednou strukturu. Skládá se z tzv. **HDU** (*Header and Data Units*). Každá taková jednotka má dvě části:

1. **Hlavička (Header)**: Textová část čitelná i běžným lidským okem. Obsahuje klíčová slova a jejich hodnoty, které přesně popisují, co, kdy, kde a jak bylo pozorováno.
2. **Datová část (Data)**: Surová binární matice čísel (např. hodnoty pixelů na senzoru nebo řádky tabulky).

Zajímavostí je, že celý soubor FITS je přísně rozdělen do pevných bloků o velikosti **2 880 bajtů**. Každý řádek v hlavičce má přesně 80 znaků (což odpovídá historickým děrným štítkům). V jednom bloku o 2880 bajtech se tak nachází přesně 36 textových řádků hlavičky:

$$36 \times 80 = 2\,880 \text{ bajtů}$$

Pokud má hlavička méně řádků, zbytek bloku se vyplní mezerami. Datový blok následuje bezprostředně za hlavičkou a je rovněž zarovnán na násobky 2880 bajtů.

3.3 Co všechno o snímku prozradí hlavička

Hlavička souboru FITS je vědeckým pasem každého astronomického pozorování. Bez ní by byla matice pixelů pouhou změtí náhodných čísel.

Zde je ukázka několika klíčových řádků z reálné FITS hlavičky:

```
SIMPLE =          T / Soubor splňuje standard FITS
BITPIX =         -32 / Datový typ: 32bitové číslo s plovoucí čárkou
NAXIS   =          2 / Počet dimenzí: 2D obraz
NAXIS1  =        4096 / Šířka snímku v pixelech
NAXIS2  =        4096 / Výška snímku v pixelech
TELESCOP= 'ESO-VLT-U4' / Název dalekohledu: Very Large Telescope Unit 4
INSTRUME= 'HAWK-I'   / Pozorovací přístroj: Infračervená kamera
DATE-OBS= '2026-05-14T04:18:22' / Přesný čas zahájení expozice (UTC)
EXPTIME =        300.0 / Doba trvání expozice v sekundách
FILTER  = 'Ks'       / Použitý infračervený filtr (2.15 mikronu)
CRVAL1  =        187.705930 / Rektascenze středu pole ve stupních
CRVAL2  =        12.391120 / Deklinace středu pole ve stupních
CDELTA1 =       -0.00002944 / Měřítko pixelu v ose X (stupně na pixel)
CDELTA2 =        0.00002944 / Měřítko pixelu v ose Y (stupně na pixel)
END
```

Všimněte si, co všechno počítá z těchto několika řádků okamžitě ví:

- Zná rozměry obrazu (4096 $\times$ 4096 pixelů, tedy 16 megapixelů).
- Ví, že data jsou uložena jako 32bitová desetinná čísla ('BITPIX = -32').

- Přesně ví, který dalekohled snímek pořídil, jak dlouho byla otevřená závěrka a přes jaký filtr světlo prošlo.
- A co je nejdůležitější: díky klíčovým slovům `CRVAL` a `CDELTA` (systém WCS) počítač přesně ví, na které místo na obloze se dalekohled díval. Každý jednotlivý pixel na monitoru má přiřazenu svou nebeskou zeměpisnou šířku a délku!

Část II: Očista dat aneb Jak získat čistý signál z vesmíru

Surový snímek z astronomického dalekohledu není připraven k vědecké analýze. Je znečištěn tepelným šumem elektroniky, nedokonalostmi optiky a zásahy kosmických částic. V této části se naučíte, jak astronomové své snímky kalibrují a jak z chaotického signálu vypreparují skutečné fotony z kosmu.

Kapitola 4: Krocení šumu a kalibrace vědeckého obrazu

Když se podíváte na surový snímek přímo vyčtený z dalekohledu (tzv. *Raw data*), často budete zklamáni. Místo úchvatné mlhoviny uvidíte zašedlý obrazec posetý zrnitým šumem, tmavými rohy a podivnými skvrnami. V této kapitole si ukážeme, proč tyto vady vznikají a jak je pomocí matematiky a tří speciálních kalibračních snímků dokážeme beze zbytku vymazat.

4.1 Proč každý senzor šumí: Zdroje nežádoucího signálu

Křemíkový čip není ideální kouzelné zrcadlo. Je to fyzické elektronické zařízení, které trpí třemi základními druhy šumu:

1. **Čtecí šum (Read Noise):** Vzniká v elektronice na samotném čipu ve chvíli, kdy se nashromážděný elektrický náboj v pixelech převádí na napětí a měří. Tento šum je přítomen vždy, i při nulové délce expozice.
 2. **Tepelný šum (Temný proud / Dark Current):** Křemíkové atomy v čipu při pokojové teplotě neustále vibrují tepelným pohybem. Občas tato tepelná vibrace uvolní elektron do pixelu sama od sebe – bez přítomnosti jakéhokoliv světla! Čím déle expozice trvá a čím je čip teplejší, tím více falešných „tepelných elektronů“ se v pixelech nashromáždí. Proto se astronomické kamery chladí Peltierovými články nebo tekutým dusíkem na teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 3. **Fotonový (Poissonův) šum:** Tento šum nevzniká v kameře, ale je základní vlastností samotného světla. Fotony z vesmíru nepřilétají jako plynulý proud vody z kohoutku, ale jako náhodné kapky deště. Počet fotonů zachycených za sekundu přirozeně statisticky kolísá.
-

4.2 Tři záchranné kruhy: Bias, Dark a Flat-field

Abychom surový snímek (*Raw*) očistili, pořizují astronomové tři typy pomocných kalibračních snímků:

1. Nulový snímek (Bias Frame)

- **Jak vzniká:** Závěrka dalekohledu zůstane zavřená (úplná tma) a nastaví se nejkratší možný expoziční čas, jaký kamera zvládne (typicky 0,001 sekundy).
 - **Co zachycuje:** Zachycuje čistý čtecí šum elektroniky a umělý napěťový posun (tzv. *pedestal*), který výrobci přidávají, aby naměřené hodnoty nespadly pod nulu.
-

2. Temný snímek (Dark Frame)

- **Jak vzniká:** Závěrka je opět zavřená, ale exponuje se **přesně stejnou dobu a při stejné teplotě** jako vědecký snímek noční oblohy (např. 300 sekund při -20 °C).
- **Co zachycuje:** Zachycuje elektrony vygenerované teplem za danou dobu expozice. Zahrnuje v sobě jak čtecí šum (Bias), tak temný proud.

3. Snímek bílé plochy (Flat Field)

- **Jak vzniká:** Dalekohled namíříme na dokonale rovnoměrně osvětlenou plochu (např. bílé plátno v kopuli nebo oblohu během soumraku) a pořídíme středně dlouhou expozici přes daný filtr.
- **Co zachycuje:** Zachycuje optické nerovnoměrnosti soustavy – **vinětaci** (ztmavnutí rohů snímku způsobené tubusem) a stíny drobných prachových zrněk usazených na filtrech a krycím skle senzoru (tzv. *dust donuts*).

4.3 Výsledná kalibrační rovnice

Jakmile máme tyto snímky v počítači, provedeme pro každý jednotlivý pixel následující elegantní matematickou operaci:

$$\text{Kalibrovaný obraz} = \frac{\text{Surový snímek} - \text{Master Dark}}{\text{Master Flat} - \text{Master Bias}} \times \text{střední hodnota}$$

Podívejme se, co se stane:

- V čitateli odečtením snímku `Master Dark` zcela vymažeme tepelný šum i čtecí offset. Zbude pouze čisté světlo přicházející z vesmíru.
- Ve jmenovateli vydělením normalizovaným snímek `Flat Field` srovnáme citlivost všech pixelů na stejnou úroveň – prachová kolečka a ztmavené rohy zmizí jako mávnutím kouzelného proutku.

Výsledkem je vědecky čistý, fotometricky plochý obraz, kde hodnota každého pixelu přesně odpovídá počtu fotonů, které do něj poslala noční obloha.

Kapitola 5: Kosmické záření a vady detektorů

I po odečtení temného proudu a aplikaci flat-fieldu zůstávají na astronomických snímcích nežádoucí artefakty. Některé pocházejí z hlubokého vesmíru, jiné jsou důsledkem mikroskopických kazů v křemíkovém krystalu. V této kapitole si ukážeme, jak počítačové algoritmy tyto vady detekují a opravují.

5.1 Zbloudilé částice: Zásahy kosmického záření

Když se podíváte na nezpracovaný astronomický snímek, všimnete si ostrých, sněhobílých teček, čárek a podivných klikyháků, které neodpovídají žádné hvězdě. Jde o zásahy **kosmického záření** (*Cosmic Rays*).

Co je to kosmické záření?

- Jsou to extrémně rychlé nabitě částice (převážně protony a jádra helia) urychlené výbuchy supernov nebo v okolí supermasivních černých děr na rychlosti blízké rychlosti světla.
- Když taková částice proletí křemíkovým čipem dalekohledu, ionizuje atomy podél své dráhy a zanechá za sebou stovky až tisíce falešných elektronů.

Zatímco na zemském povrchu nás před většinou kosmického záření chrání zemská atmosféra, dalekohledy na vysokých horách (Mauna Kea, La Silla) a zejména vesmírné dalekohledy (Hubble, James Webb) jsou tímto bombardováním zasaženy nepřetržitě. Během hodinové expozice na oběžné dráze zasáhnou kosmické paprsky tisíce pixelů.

5.2 Jak algoritmus L.A. Cosmic pozná částici od skutečné hvězdy

Jak počítač pozná, zda je jasný bod na snímku skutečná vzdálená hvězda, nebo jen falešná stopa kosmického protonu?

Klíčem je fyzika optického zobrazení:

- Světlo z reálné hvězdy prochází optickou soustavou dalekohledu a vlivem ohybu světla (difrakce) se na čipu vždy rozostří do charakteristického zvonovitého tvaru – tzv. **bodové funkce odezvy (PSF)**. Hvězda má hladké okraje rozprostřené přes několik sousedních pixelů.
- Kosmická částice však optikou neprochází – vrazí přímo do křemíku. Její stopa je proto nepřírodně ostrá, má strmé hrany a často zasáhne pouze jediný izolovaný pixel nebo vytvoří tenkou ostrou čáru.

V roce 2001 vyvinul nizozemský astrofyzik Pieter van Dokkum přelomový algoritmus **L.A.Cosmic** (*Laplacian Cosmic Ray Identification*):

1. Algoritmus aplikuje na snímek laplacián (druhou prostorovou derivaci), který měří ostrost hran.
2. Všechny body s ostrostí přesahující difrakční limit dalekohledu jsou okamžitě označeny jako kosmické záření.
3. Poškozené pixely jsou označeny ve speciální binární masce a jejich hodnoty jsou nahrazeny hladkou interpolací z okolních nepoškozených pixelů.

5.3 Mrtvé a horké pixely: Defektní masky

Žádný křemíkový čip na světě není vyroben bezchybně. Na čipu s desítkami milionů pixelů se vždy vyskytuje určité procento defektů:

- **Mrtvé pixely (Dead Pixels):** Zcela necitlivé buňky, které neprodukují žádný signál (trvale hodnota 0). Na snímku se projevují jako černé tečky.
- **Horké pixely (Hot Pixels):** Pixely s defektem krystalové mřížky, kde dochází k masivnímu samovolnému úniku elektronů. Tyto pixely září naplno jako jasné body i při krátké expozici ve tmě.

Řešení je v astroinformatice překvapivě přímočaré: Astronomové vytvoří tzv. **masku vadných pixelů** (*Bad Pixel Mask*). Jde o matici nul a jedniček, kde jednička označuje vadný pixel. Během zpracování dat počítač tyto pixely jednoduše ignoruje a jejich hodnotu dopočítá jako vážený průměr sousedních zdravých pixelů.

Část III: Poloha a měření světla na obloze

V této části přejdeme od práce s pixely k samotné astronomické fyzice. Dozvíte se, jak počítač dokáže sám rozpoznat, na které souhvězdí se dívá, jak z jasů bodu na monitoru změříme skutečnou energii vyzařovanou hvězdou a jak z rozloženého světla (spektra) vyčteme chemické složení a rychlost vesmírných těles.

Kapitola 6: Kde na nebi vlastně jsme? (Úvod do astrometrie a WCS)

Představte si, že vám někdo pošle snímek s tisíci neznámými hvězdami, ale neřekne vám, kam byl dalekohled namířen. Jak počítač dokáže během několika sekund zjistit přesné nebeské souřadnice každého bodu? Této disciplíně říkáme **astrometrie**.

6.1 Souřadnice na nebeské klenbě: Rektascenze a Deklinace

Stejně jako na Zemi určujeme polohu měst pomocí zeměpisné šířky a délky, na nebeské sféře používáme ekvatoriální souřadnicový systém:

- **Deklinace (δ nebo Dec):** Odpovídá zeměpisné šířce. Měří se ve stupních, minutách a vteřinách od nebeského rovníku (0°) k severnímu nebeskému pólu ($+90^\circ$, kde leží Polárka) a k jižnímu pólu (-90°).
- **Rektascenze (α nebo RA):** Odpovídá zeměpisné délce. Tradičně se měří v hodinách, minutách a sekundách (od 0h do 24h), protože zemská rotace otočí oblohu o 360° za 24 hodin ($1h = 15^\circ$). Výchozím bodem je jarní bod, kde Slunce překračuje nebeský rovník na jaře.

6.2 Systém WCS: Most mezi pixely a oblohou

Když máte FITS snímek, jeho pixely mají souřadnice v řádcích a sloupcích: (x, y) (např. pixel na pozici 1024, 768). Vědec však potřebuje vědět, jaké (α, δ) tomuto pixelu odpovídají.

Tento převod zajišťuje mezinárodní standard **WCS** (*World Coordinate System*). WCS je sada matematických vzorců zapsaná v hlavičce FITS souboru, která obsahuje:

1. **Referenční pixel** (``CRPIX1``, ``CRPIX2``): Bod na snímku (obvykle střed čipu), jehož souřadnice přesně známe.
2. **Referenční nebeské souřadnice** (``CRVAL1``, ``CRVAL2``): Přesná rektascenze a deklinace tohoto referenčního pixelu.
3. **Měřítko a rotaci pole** (``CDELT`` nebo matice ``CD``): Určuje, kolik úhlových vteřin oblohy pokrývá jeden pixel a jak je snímek pootočen vůči severu.
4. **Projekční funkci**: Obloha je zakřivená kulová plocha, zatímco čip je plochý. Podobně jako u map světa musíme použít matematickou projekci (např. gnomonickou projekci ``TAN``).

Díky WCS stačí v jakémkoliv astronomickém programu kliknout myší na libovolnou hvězdu a software okamžitě zobrazí její přesné nebeské souřadnice.

6.3 Plate Solving: Zázrak automatického rozpoznání oblohy

Co když máme snímek, který WCS hlavičku vůbec nemá? V minulosti musel astronom vzít tištěný hvězdný atlas a ručně vyhledávat známé hvězdy. Dnes tuto práci během několika sekund zvládne algoritmus zvaný **Plate Solving** (Astrometrické řešení pole).

Jak Plate Solving funguje?

1. Algoritmus na snímku vyhledá nejjasnější hvězdy a změří jejich vzájemné polohy.
2. Z každé trojice sousedních hvězd vytvoří **trojúhelník** a spočítá poměry jeho vnitřních úhlů a stran. Poměry úhlů v trojúhelníku jsou nezávislé na rotaci i na velikosti zorného pole!
3. Tyto geometrické otisky porovná s předpočítanou globální databází hvězdných trojúhelníků (např. z katalogu Gaia).
4. Jakmile najde shodu, přesně dopočítá střed pole, měřítko vteřin na pixel, rotaci a automaticky запиše kompletní WCS hlavičku do FITS souboru.

Kapitola 7: Měření jasu hvězd (Základy fotometrie)

Astronomická fotografie není určena jen k obdivování krásy vesmíru. Jejím hlavním úkolem je poskytovat přesná čísla. Disciplína, která se zabývá měřením množství elektromagnetického záření přicházejícího z vesmírných objektů, se nazývá **fotometrie**. V této kapitole si ukážeme, jak z pixelů spočítat jasnost hvězdy.

7.1 Od počítání fotonů k astronomickým magnitudám

Jasnost hvězd se v astronomii tradičně udává v **magnitudách** (hvězdných velikostech, značka m nebo mag). Tento systém vymyslel už starověký řecký astronom Hipparchos ve 2. století př. n. l., když rozdělil hvězdy viditelné pouhým okem do 6 tříd:

- Nejjasnější hvězdy na nebi označil jako 1. velikost (1^{m}).
- Nejslabší hvězdy na hranici viditelnosti jako 6. velikost (6^{m}).

V 19. století anglický astronom Norman Pogson zjistil, že lidské oko vnímá jasnost logaritmicky, a definoval přesný matematický vztah, který používáme dodnes: **rozdíl 5 magnitud odpovídá přesně stonásobnému poměru jasností**.

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)$$

Kde F_1 a F_2 jsou toky záření (počet fotonů za sekundu). Všimněte si záporného znaménka: **čím menší nebo zápornější číslo magnitudy je, tím je hvězda jasnější!**

- Slunce na obloze má přibližně $-26,7^{\text{m}}$.
- Měsíc v úplňku $-12,7^{\text{m}}$.
- Nejjasnější noční hvězda Sírius $-1,46^{\text{m}}$.
- Nejslabší objekty zachycené vesmírným teleskopem Jamese Webba dosahují až $+31^{\text{m}}$ (jsou tedy více než stamilionkrát slabší než nejslabší hvězdy viditelné lidským okem).

7.2 Aperturní fotometrie: Jak změřit světlo hvězdy na monitoru

Nejrozšířenější metodou měření jasu izolované hvězdy je **aperturní fotometrie**. Jde o překvapivě přímočarý počítačový postup:

1. **Fotometrická apertura:** Kolem středu hvězdy software opíše virtuální kružnici o poloměru r (aperturu). Sečte hodnoty všech pixelů uvnitř této kružnice. Tento součet však obsahuje nejen světlo hvězdy, ale také záření zemské atmosféry a světelného znečištění pod hvězdou.
2. **Prstenec pozadí (Sky Annulus):** Kolem apertury software vytvoří soustředný prstenec o vnitřním poloměru r_{in} a vnějším poloměru r_{out} . V tomto prstenci nejsou žádné hvězdy, nachází se zde pouze prázdná obloha. Počítač změří průměrný jas na jeden pixel oblohy.
3. **Odečtení pozadí:** Od celkového toku v apertuře se odečte průměrný jas oblohy vynásobený počtem pixelů uvnitř apertury:

$$F_{\text{hvězda}} = \sum_{\text{apertura}} I_i - N_{\text{pix}} \times \bar{I}_{\text{obloha}}$$

Výsledkem je čistý tok fotonů přicházejících výhradně z pozorované hvězdy!

7.3 PSF fotometrie: Když jsou hvězdy natlačeny na sebe

Aperturní fotometrie funguje skvěle, pokud je hvězda na obloze osamocená. Co ale dělat v kulových hvězdokupách nebo v hustých oblastech Mléčné dráhy, kde se světlo stovek hvězd vzájemně překrývá a kružnice apertur by zasahovaly jedna do druhé?

V takovém případě nastupuje **PSF fotometrie** (modelování bodové funkce odezvy):

- Algoritmus změří tvar nezkreslené izolované hvězdy a vytvoří matematický profil odezvy dalekohledu (PSF).
- V hustém poli pak počítač prokládá tyto matematické profily všemi hvězdami současně. Dokáže spočítat jasnost dvou hvězd, i když jsou jejich středy vzdáleny pouhý jeden nebo dva pixely od sebe.

Kapitola 8: Hvězdná spektra: Čtení chemických vzkazů ze světla

Pokud je fotometrie měřením celkového množství světla, pak **spektroskopie** je jeho hlubokým rozbořením. Běžný snímek nám ukáže, kde hvězda je a jak jasně svítí. Spektrum nám však prozradí, z čeho se skládá, jak je horká, jakou má gravitaci a jakou rychlostí se pohybuje. V této kapitole si ukážeme, jak počítače čtou tento „čárový kód vesmíru“.

8.1 Od duhového pruhu k jednorozměrnému vědeckému grafu

Když světlo hvězdy projde spektrografem (optickým hranolem nebo difrakční mřížkou), rozloží se na jednotlivé barvy – od fialové přes modrou, zelenou, žlutou až po červenou.

Na digitálním senzoru se toto spektrum zaznamená jako podlouhlý duhový proužek. V tomto proužku si všimnete stovek tenkých tmavých linek. Jsou to **absorpční čáry**, které v roce 1814 podrobně popsal německý optik Joseph von Fraunhofer.

Prvním úkolem astroinformatika je převést tento 2D obrázek na 1D vědecký graf:

1. Počítač najde stopu spektra a sečte hodnoty pixelů v kolmém směru (extrakce profilu).
2. Provede **vlnovou kalibraci**: pomocí výbojky s plynem o přesně známém složení (např. thorium–argon) přiřadí každému pixelu na vodorovné ose přesnou fyzikální vlnovou délku v nanometrech (nm) nebo angströmech (Å).
3. Výsledkem je graf závislosti toku záření na vlnové délce.

8.2 Čárový kód prvků: Jak poznat složení hvězdy na dálku

Každý chemický prvek periodické soustavy má zcela unikátní strukturu elektronových hladin v atomovém obalu:

- Když foton o určité vlnové délce prolétá chladnější atmosférou hvězdy, atom prvku (např. vodíku nebo železa) foton pohltí a jeho elektron přeskočí na vyšší energetickou hladinu.
- Ve spektru tím vznikne na přesně dané vlnové délce temná absorpční čára.

Vodík vytváří slavnou **Balmerovu sérii** (např. čáru $H\alpha$ na 656,3 nm, čáru $H\beta$ na 486,1 nm). Sodík zanechává charakteristický oranžový dublet na 589 nm, vápník výrazné čáry H a K v ultrafialové oblasti.

Počítačový algoritmus porovná polohu naměřených absorpčních čar s laboratorní databází prvků (např. NIST databáze atomových spekter) a během zlomku sekundy přesně vyčíslí, kolik procent vodíku, helia, uhlíku či železa hvězda obsahuje.

8.3 Dopplerův jev: Kosmický rychloměr

Pokud se hvězda vůči nám pohybuje, vlnové délky jejích spektrálních čar se posunou. Tento jev popsal v roce 1842 rakouský fyzik Christian Doppler:

- **Modrý posuv:** Pokud se hvězda přibližuje k Zemi, světelné vlny se stlačují a všechny čáry ve spektru se posouvají ke kratším vlnovým délkám (k modrému konci).
- **Rudý posuv:** Pokud se hvězda vzdaluje, vlny se natahují a čáry se posouvají k delším vlnovým délkám (k červenému konci).

Vztah pro radiální rychlost v_r při rychlostech mnohem menších než rychlost světla c je překvapivě jednoduchý:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}$$

Kde λ_0 je laboratorní klidová vlnová délka čáry a $\Delta\lambda = \lambda_{\text{naměřená}} - \lambda_0$.

Díky moderním algoritmům křížové korelace (CCF) dokáží počítače změřit posun spektrálních čar o pouhý zlomek tisícin pixelu. To odpovídá měření rychlosti pohybu hvězdy s neuvěřitelnou přesností na desítky centimetrů za sekundu (rychlost plazící se želvy) na vzdálenost stovek světelných let!

Část IV: Čas, proměnnost a hledání nových světů

Noční obloha není statická. Hvězdy pulzují, vybuchují a obíhají kolem sebe. V této části se seznámíte s časovými řadami a světelnými křivkami a zjistíte, jak počítačové algoritmy dokáží z nepatrných poklesů jasu odhalit planety obíhající kolem cizích sluncí.

Kapitola 9: Světelné křivky a proměnné jevy

Až dosud jsme se dívali na vesmír jako na statický snímek v jediném okamžiku. Vesmír je však plný dynamického pohybu a změn. Když astronom změří jasnost určité hvězdy stokrát nebo tisíckrát za sebou, získá **časovou řadu** (Time Series). Grafu znázorňujícímu, jak se jasnost objektu mění s plynoucím časem, říkáme **světelná křivka** (*Light Curve*).

9.1 Co nám prozradí světelná křivka

Světelná křivka má na vodorovné ose čas (obvykle v juliánských dnech nebo hodinách) a na svislé ose jasnost (v magnitudách nebo fotonickém toku).

Z tvaru této křivky dokáže astroinformatik vyčíst fascinující fyzikální děje:

- **Fyzicky proměnné hvězdy (pulzující):** Hvězdy jako Cefeidy nebo RR Lyrae doslova dýchají. Pravidelně se rozpínají a smršťují, čímž mění svůj povrch, teplotu i zářivý výkon v periodě několika hodin až desítek dní.
- **Geometricky proměnné hvězdy (zákrytové dvojhvězdy):** Dvě hvězdy obíhající kolem společného těžiště v rovině našeho pohledu se vzájemně zakrývají. Na světelné křivce vidíme hluboký primární pokles (když chladnější hvězda zakryje teplejší) a mělčí sekundární pokles (opačný zákryt).
- **Kataklyzmatické a eruptivní jevy:** Náhlé, dramatické zjasnění o desítky magnitud během několika hodin, následované pomalým pohasínáním po celé měsíce, prozradí výbuch supernovy – zánik masivní hvězdy v závěrečném gravitačním kolapsu.

9.2 Problém astronomického vzorkování: Mezery v datech

V běžné informatice (např. při záznamu zvuku do formátu MP3) jsou data vzorkována naprosto rovnoměrně – mikrofon změří zvuk přesně 44 100-krát za vteřinu.

V astronomii je však situace zcela odlišná:

1. **Střídání dne a noci:** Z pozemského dalekohledu můžeme pozorovat pouze v noci. Každých 12 hodin vzniká v datech nevyhnutelná díra.
2. **Počasí a mraky:** Pozorování náhodně přeruší bouřka nebo oblačnost na několik dní.
3. **Sezónní viditelnost:** Většina souhvězdí je ze Země pozorovatelná jen po několik měsíců v roce, než se za nimi ocitne Slunce.

Astronomická data jsou proto **extrémně nepravidelně vzorkovaná** (*Unevenly Sampled Data*). Klasické matematické metody, jako je rychlá Fourierova transformace (FFT), na nich zcela selhávají a vytvářejí falešné artefakty způsobené právě denním cyklem. Proto musela astroinformatika vyvinout speciální algoritmy pro nepravidelná data, kterým vévodí slavný **Lombův–Scargleův periodogram**.

Kapitola 10: Objevování exoplanet pomocí analýzy dat

Jedním z největších triumfů moderní astroinformatiky je objev tisíců **exoplanet** – planet obíhajících kolem cizích hvězd. Většinu z nich jsme nikdy přímo nespatřili a ani největší teleskopy světa je nezobrazí jako kotouček. Jak tedy víme, že existují? Odhalily je počítače z analýzy světelných křivek.

10.1 Tranzitní metoda: Komár před reflektorem

Když planeta při svém oběhu projde přímo mezi svou mateřskou hvězdou a naším dalekohledem, dojde k tzv. **tranzitu** (částečnému zákrytu).

Planeta na několik hodin zakryje nepatrnou část hvězdného disku. Jasnost hvězdy poklesne. O kolik?

- Obří plynná planeta velikosti Jupitera způsobí pokles jasu zhruba o **1 %** (0,01).
- Kamenná planeta velikosti naší Země způsobí pokles jasu o pouhou **jednu setinu procenta** (0,0001 neboli 100 ppm – parts per million).

Představte si to jako snahu zaznamenat nepatrné ztlumení dálkového reflektoru kamionu ve chvíli, kdy před ním proletí malý komár! Lidské oko nemá šanci takovou změnu postřehnout. Kosmické fotometry a citlivé algoritmy to však dokážou s naprostou jistotou.

Hloubka tranzitu $\Delta F/F$ přímo určuje poměr velikosti planety R_p k poloměru hvězdy R_* :

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Z pouhého poklesu jasu tak počítač okamžitě spočítá přesný poloměr vzdálené planety!

10.2 Fázování světelné křivky (Phase Folding)

Jediný tranzit k objevu nestačí – mohl by to být pouhý šum nebo prolétající asteroid. Vědci potřebují prokázat, že se zákryt opakuje s železnou pravidelností Keplerových zákonů.

Pokud máme data za několik let pozorování, tranzity se opakují každých P dní (oběžná doba planety). Algoritmus provede operaci zvanou **fázování** (*Phase Folding*):

1. Algoritmus testuje tisíce různých zkušebních period P .

2. Pro každou periodu přepočítá čas každého měření na orbitální fázi $\phi \in [0, 1)$ podle vzorce:

$$\phi = \frac{t - t_0}{P} \pmod{1}$$

1. Všechna pozorování rozptýlená přes roky měření složí přes sebe do jediného cyklu.

Pokud je testovaná perioda chybná, body vytvoří náhodný neuspořádaný mrak. Pokud však algoritmus trefí přesnou oběžnou dobu planety, všechny jednotlivé tranzity se seřadí dokonale na sebe a z náhodného šumu vystoupí křišťálově čistý profil planetárního tranzitu ve tvaru písmene U.

10.3 Hrdinové lovu planet: Družice Kepler a TESS

Kosmický dalekohled **Kepler** (NASA, 2009–2018) nepřetržitě sledoval jasnost více než 150 000 hvězd v souhvězdí Labutě. Výsledkem bylo více než 2 700 potvrzených exoplanet a dalších několik tisíc kandidátů.

Jeho nástupce, družice **TESS** (Transiting Exoplanet Survey Satellite), monitoruje téměř celou oblohu a hledá planety u nejbližších a nejjasnějších hvězd.

Zpracování dat z těchto misí bylo plně automatizováno: speciální algoritmus zvaný **BLS** (*Box-fitting Least Squares*) automaticky prohledává miliony světelných křivek a sám upozorňuje astronomy na slibné kandidáty na nové světy.

Část V: Jak počítač pracuje s nejistotou (Statistika jednoduše)

V této části nahlédneme do srdce vědecké metody. Zjistíte, proč v astronomii neexistuje pojem „naprosto přesné číslo“, jak se vypořádat s chybami měření, jak funguje metoda nejmenších čtverců a jak poznáme, zda naše teorie skutečně odpovídá pozorované realitě.

Kapitola 11: Proč žádné měření v astronomii není přesné (Teorie chyb)

Ve škole se často učíme, že věda pracuje s exaktními čísly: rychlost světla je 299 792 458 m/s a vzdálenost Země od Slunce je 149 597 870,7 km. V reálném pozorovacím světě však žádné absolutně přesné číslo neexistuje. V této kapitole si ukážeme, proč se v astronomii žádná hodnota neobejde bez své „chyby“.

11.1 Každé číslo potřebuje svou nejistotu

Představte si dva astronomy, kteří měří jasnost téže nově objevené supernovy:

- První astronom nahlásí: „*Jasnost supernovy je 15,2 magnitudy.*“
- Druhý astronom nahlásí: „*Jasnost supernovy je $15,2 \pm 0,1$ magnitudy.*“

Zatímco první výrok je z vědeckého hlediska bezcenný, druhý výrok je plnohodnotným vědeckým výsledkem. Zápis $\pm 0,1$ je **odhad nejistoty** (směrodatná odchylka σ). Říká nám, že s pravděpodobností přibližně 68 % leží skutečná hodnota v intervalu od 15,1 do 15,3 mag.

Bez znalosti nejistoty nelze ověřit žádnou vědeckou teorii. Kdyby teoretický model předpovídal jasnost 15,35 mag, pro prvního astronoma je výsledek nejasný. Pro druhého astronoma model spadá do pásma $1,5\sigma$, což je ve výborné shodě s měřením.

11.2 Dva králové chyb: Gaussovo a Poissonovo rozdělení

V astroinformatice pracujeme se dvěma základními modely náhodných chyb:

1. Poissonovo rozdělení (Fotonický šum)

Používá se pro jevy, které spočívají v **počítání diskrétních událostí** (např. dopadů fotonů na senzor za sekundu). Klíčovou vlastností Poissonova rozdělení je, že jeho rozptyl se rovná střední hodnotě μ :

$$\sigma = \sqrt{N}$$

Pokud během expozice zachytíte v pixelu $N = 100$ fotonů, přirozená statistická nejistota je $\sqrt{100} = 10$ fotonů. Vaše měření je 100 ± 10 fotonů (relativní chyba je 10 %). Pokud však exponujete déle a zachytíte $N = 10\,000$ fotonů, nejistota je $\sqrt{10\,000} = 100$ fotonů. Vaše relativní chyba klesne na pouhé 1 %!

i ZAJÍMAVOST

Z toho plyne zlaté pravidlo astrofotografie: **Chcete-li snížit relativní šum na polovinu, musíte celkovou dobu expozice prodloužit čtyřikrát!**

2. Gaussovo (normální) rozdělení (Tepelný a čtecí šum)

Když na měření působí velké množství drobných, nezávislých náhodných vlivů (kolísání napětí v obvodu, tepelné kmitání krystalové mřížky, drobné záchvěvy zemské atmosféry), výsledné rozdělení chyb má tvar symetrického zvonu – **Gaussovy křivky**.

Pro Gaussovo rozdělení platí slavné **pravidlo 3σ** :

- 68,3 % všech měření leží v pásmu $\pm 1\sigma$ kolem průměru.
- 95,4 % měření leží v pásmu $\pm 2\sigma$.
- 99,7 % měření leží v pásmu $\pm 3\sigma$.

Pokud astronom v datech narazí na signál, který převyšuje průměrný šum o 5σ (pravděpodobnost náhodného vzniku menší než 1 : 3 500 000), považuje se jev v částicové fyzice i astronomii za **oficiální objev**.

Kapitola 12: Prokládání dat přímkou a křivkou (Lineární regrese)

Máte v tabulce sto naměřených bodů – například vzdálenosti galaxií a rychlosti, kterými se od nás vzdalují. Jak těmito body proložit nejlepší možnou přímkou a odvodit z ní Hubbleovu konstantu popisující rozpínání vesmíru? K tomu slouží **regresní analýza**.

12.1 Metoda nejmenších čtverců (Least Squares)

V roce 1801 mladý německý matematik Carl Friedrich Gauss vyřešil záhadu ztracené trpasličí planety Ceres. Astronom Giuseppe Piazzi ji pozoroval pouhých 40 dní, než se ztratila v záři Slunce, a nikdo nevěděl, kde se znovu vynoří. Gauss použil novou matematickou metodu, kterou dnes používá každý vědecký software – **metodu nejmenších čtverců**.

Princip je nádherně intuitivní:

1. Máme sadu naměřených bodů $[x_i, y_i]$.
2. Hledáme rovnici přímky $y = a \cdot x + b$, která body vystihuje nejlépe.
3. Pro každý bod spočítáme svislou odchylku (tzv. *reziduum*) mezi skutečně naměřenou hodnotou y_i a hodnotou předpovězenou přímkou $\hat{y}_i$.
4. Tyto odchylky umocníme na druhou (čtverec odchylky zajistí, že záporné odchylky se neodečtou s kladnými a velké chyby jsou potrestány více než malé).
5. Hledáme takové parametry a a b , aby celkový součet těchto čtverců byl **co nejmenší možný**:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - (a \cdot x_i + b))^2 \longrightarrow \min$$

12.2 Co dělat s odlehlými body (Outliers)

Běžná metoda nejmenších čtverců má jednu obrovskou slabinu: je extrémně citlivá na hrubé chyby. Pokud vám do jednoho z měření zasáhne kosmická částice nebo kolem proletí satelit, získáte jeden bod, který leží dramaticky mimo všechny ostatní.

Protože metoda odchylky umocňuje na druhou, jediný extrémně odlehlý bod dokáže celou přímku strhnout k sobě a znehodnotit celý vědecký výsledek!

Astroinformatika proto využívá **robustní regresní metody**:

- **Sigma clipping:** Algoritmus nejprve proloží data přímkou, spočítá odchylky všech bodů, body vzdálené více než 3σ vymaže a regresi spočítá znovu s čistými daty.
- **Huberova regrese:** Pro malé odchylky používá čtverce, ale pro velké odchylky přejde na lineární penalizaci, takže odlehlý bod nemá šanci přímku zvrátit.
- **RANSAC:** Algoritmus náhodně vybírá malé podmnožiny bodů, hledá shodu a automaticky oddělí věrohodná data (*inliers*) od chybného šumu (*outliers*).

12.3 Kritérium chí-kvadrát: Jak poznat dobrou shodu

Jak poznáme, zda náš model datům skutečně odpovídá? K tomu používáme statistiku **chí-kvadrát** (χ^2):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right)^2$$

Zde každou odchylku dělíme známou chybou měření σ_i .

Pokud je náš model správný a chyby jsme odhadli realisticky, hodnota tzv. **redukovaného chí-kvadrát** $\chi^2_\nu = \chi^2/\nu$ (kde ν je počet stupňů volnosti) by se měla pohybovat **kolem hodnoty 1**:

- $\chi^2_\nu \approx 1$: Vynikající shoda modelu s daty.
- $\chi^2_\nu \gg 1$: Model datům neodpovídá (naše teorie je špatná) nebo jsme hrubě podcenili chyby měření.
- $\chi^2_\nu \ll 1$: Podezřele dobrý výsledek – pravděpodobně jsme chyby měření zbytečně přecenili.

Část VI: Umělá inteligence, virtuální observatoře a praxe

Závěrečná část knihy vás zavede na samotnou hranici současného výzkumu. Zjistíte, jak strojové učení pomáhá třídit miliony galaxií, jak si na svém vlastním počítači otevřít virtuální observatoř a jak si v jazyce Python vyzkoušet reálnou analýzu dat z kosmických teleskopů.

Kapitola 13: Úvod do strojového učení pro astronomy

Představte si, že vám z přehlídky oblohy dorazí katalog obsahující 500 milionů nově vyfotografovaných objektů. Potřebujete zjistit, které z nich jsou hvězdy, které kvazary a které vzdálené galaxie. Kdyby astronom strávil tříděním každého objektu pouze dvě sekundy, trvala by mu tato práce přes 30 let bez spánku a jídla. Zde přichází na scénu **strojové učení** (*Machine Learning*).

13.1 Co je to strojové učení lidsky a srozumitelně

V klasickém programování píše člověk přesná pravidla:

$$\text{Data} + \text{Pravidla} \longrightarrow \text{Odpovědi}$$

Například: „*Pokud má objekt v barevném filtru index $g - r > 1,5$ a má kruhový tvar, označ ho jako eliptickou galaxii.*“ Ve složitém vesmíru však taková jednoduchá pravidla selhávají.

Ve strojovém učení postupujeme opačně:

$$\text{Data} + \text{Správné odpovědi} \longrightarrow \text{Pravidla (Model)}$$

Počítači předložíme deset tisíc snímků galaxií, které předtím lidští odborníci pečlivě roztřídili. Algoritmus sám analyzuje miliony pixelů, vyhledá jemné statistické vzorce a vytvoří si vlastní vnitřní pravidla. Když mu pak předložíte milion zcela nových snímků, dokáže je roztřídit během několika minut s přesností srovnatelnou se zkušeným astronomem.

13.2 Učení s učitelem a bez učitele

V astroinformatice používáme dva základní přístupy:

1. Učení s učitelem (Supervised Learning)

Máme k dispozici trénovací data se známými štítky (např. spektrální třída hvězdy O, B, A, F, G, K, M).

- **Rozhodovací stromy a náhodné lesy (Random Forests):** Algoritmus se ptá na sérii otázek: „*Je barva $u - g < 0,5$? Je index koncentrace světla $> 2,8$? Je přítomna emise v rádiovém*

oboru?“ Na základě odpovědí prochází stromem rozhodnutí až ke konečnému zařazení objektu.

- **Využití:** Hledání vzácných kvazarů v datech přehlídky SDSS, odhad fotometrického rudého posuvu galaxií.

2. Učení bez učitele (Unsupervised Learning)

Nemáme žádné štítky. Počítači předložíme data o poloze a rychlosti milionů hvězd a řekneme: *„Najdi v těchto datech skryté shluky a skupiny, které k sobě patří.“*

- **Algoritmy shlukování (např. DBSCAN):** Dokáží v obrovském mračnu dvou miliard hvězd z družice Gaia objevit tzv. **hvězdné proudy** – pozůstatky trpasličích galaxií, které před miliardami let pohltila naše Mléčná dráha a jejichž hvězdy dodnes putují vesmírem společně stejnou rychlostí.

13.3 Hledání kosmické jehly v kupce sena: Detekce anomálií

Často vědce nezajímají běžné objekty, které se vejdou do známých škatulek. To nejzajímavější v astronomii jsou **anomálie** – objekty, které porušují všechny známé teorie.

Speciální algoritmy (např. *Isolation Forest* nebo autoenkodéry) dokáží data prozkoumat a identifikovat body, které se statisticky nepodobají ničemu jinému v databázi. Takto byla například v datech družice Kepler objevena záhadná „Tabbyina hvězda“ (KIC 8462852), jejíž světelná křivka vykazovala nepravidelné hluboké poklesy jasu, které zpočátku vyvolaly i hypotézy o cizích megastrukturách (Dysonově sféře).

Kapitola 14: Virtuální observatoře a astronomické databáze

Víte, že dnes může každý student, amatérský astronom nebo zvědavý nadšenec z pohodlí svého domova pracovat s přesně stejnými vědeckými daty jako profesionální profesori na Harvardu či v Cambridge? Umožňuje to koncept **Virtuální observatoře** (*Virtual Observatory*).

14.1 Poklady na dosah ruky: Světová datová centra

Mezinárodní astronomická komunita přijala zásadní etické pravidlo: po uplynutí krátké ochranné lhůty (typicky 6 až 12 měsíců, kdy má přednostní právo vědecký tým, který si pozorování vyžádal) se **všechna data z velkých veřejných teleskopů stávají volně přístupnými pro celé lidstvo**.

Tři nejdůležitější globální přístupové body jsou:

1. **CDS ve Štrasburku (Centre de Données astronomiques de Strasbourg)**: Srdce světové astronomické databáze. Provozuje katalog **SIMBAD** (databáze 14 milionů astronomických objektů s kompletní vědeckou literaturou) a **VizieR** (archiv tisíců katalogů z odborných článků).
2. **MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes)**: Hlavní archiv NASA pro vesmírné teleskopy Hubble, James Webb, Kepler a TESS.
3. **ESO Science Archive**: Kompletní archiv Evropské jižní observatoře obsahující data z obřích teleskopů VLT a observatoře ALMA.

14.2 Jak se ptát katalogů: Dotazovací jazyk ADQL

Když potřebujete v databázi s 1,8 miliardami hvězd z mise Gaia najít všechny hvězdy jasnější než 12. magnituda, které leží v okruhu 2 stupňů kolem mlhoviny v Orionu, nemůžete stahovat celý katalog do počítače.

Místo toho pošlete na server dotaz v jazyce **ADQL** (*Astronomical Data Query Language*). Jde o variantu známého databázového jazyka SQL rozšířenou o prostorové nebeské funkce:

```
SELECT source_id, ra, dec, phot_g_mean_mag, parallax
FROM gaiadr3.gaia_source
WHERE 1 = CONTAINS(
    POINT('ICRS', ra, dec),
    CIRCLE('ICRS', 83.82, -5.39, 2.0)
)
AND phot_g_mean_mag < 12.0
```

Během dvou sekund server projde miliardy záznamů a vrátí vám čistou tabulku přesně vyfiltrovaných hvězd!

14.3 Aladin Sky Atlas: Vesmír na vašem monitoru

Nejlepším nástrojem pro vizuální práci s virtuální observatoří je software **Aladin Sky Atlas**, vyvinutý ve Štrasburku. Tento bezplatný program funguje jako „Google Earth pro celou oblohu“:

- Umožňuje plynule přibližovat z celooblohového pohledu až na úroveň detailních snímků z Hubblea či Jamese Webba.
- Dokáže v reálném čase prolínat vrstvy v různých vlnových délkách: můžete se podívat na galaxii ve viditelném světle, jedním táhlem myši přes ni prolnout infračervený prach a přes to položit rentgenové body černých děr z družice Chandra.
- Přímou na obrazovku promítá katalogy hvězd a galaxií z Vizieru.

Kapitola 15: Praktické první krůčky v Pythonu

Programovací jazyk **Python** se v posledním desetiletí stal nepsaným standardem celé moderní astronomie a astroinformatiky. Je přehledný, elegantní a díky obří komunitě vědců nabízí knihovny pro jakýkoliv myslitelný výpočet. V této kapitole si ukážeme, jak v několika řádcích kódu otevřít skutečná vědecká data.

15.1 Zlatý standard: Ekosystém AstroPy

Páteří astronomického programování je otevřená knihovna **AstroPy**. Zajišťuje vše od čtení FITS souborů přes výpočty nebeských souřadnic až po fyzikální jednotky:

- ``astropy.io.fits``: Načítání a zápis vědeckých FITS snímků a tabulek.
- ``astropy.coordinates``: Přepočty mezi ekvatoriálními, galaktickými a obzorníkovými souřadnicemi.
- ``astropy.units``: Fyzikální výpočty s automatickou kontrolou jednotek (znemožňuje omylem sečíst metry se světelnými roky).

Pro práci nepotřebujete instalovat složitý software – stačí otevřít bezplatné prostředí **Google Colab** přímo ve vašem webovém prohlížeči.

15.2 Úloha 1: Načtení a zobrazení FITS snímku

Podívejme se, jak jednoduše lze v Pythonu načíst skutečný astronomický snímek a zobrazit jej na obrazovce:

```
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.io import fits
from astropy.visualization import ZScaleInterval

<h1>1. Otevření FITS souboru</h1>
hdul = fits.open("ngc6543_hubble.fits")
image_data = hdul[0].data
header = hdul[0].header

<h1>2. Vypsání informací z hlavičky</h1>
print(f"Rozměry snímku: {image_data.shape}")
print(f"Teleskop: {header.get('TELESCOP', 'Neznámý')}")
print(f"Expoziční čas: {header.get('EXPTIME', 0)} sekund")

<h1>3. Zobrazení s astronomickým škálováním ZScale</h1>
interval = ZScaleInterval()
vmin, vmax = interval.get_limits(image_data)

plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.imshow(image_data, cmap="inferno", vmin=vmin, vmax=vmax, origin="lower")
plt.colorbar(label="Fotonický tok [ADU]")
plt.title("Mlhovina Kočičí oko (NGC 6543) – Hubble Space Telescope")
plt.xlabel("Pixel X")
plt.ylabel("Pixel Y")
plt.show()
```

Všimněte si třídy `ZScaleInterval()`: astronomické snímky mají obrovský dynamický rozsah. Algoritmus *ZScale* automaticky zvolí optimální rozsah zobrazení tak, aby vynikly slabé mlhovinné struktury a zároveň nebyl obraz přesvícen.

15.3 Úloha 2: Vykreslení tranzitu exoplanety

S knihovnou `lightkurve` můžete stáhnout a zobrazit skutečnou světelnou křivku exoplanety přímo z archivu NASA během tří řádků kódu:

```
import lightkurve as lk
import matplotlib.pyplot as plt

<h1>1. Vyhledání a stažení světelné křivky hvězdy Kepler-10</h1>
search = lk.search_lightcurve("Kepler-10", quarter=3)
lc = search.download().remove_outliers().flatten()

<h1>2. Fázování podle známé oběžné doby kamenné exoplanety Kepler-10b (0.837 dne)</h1>
period = 0.837495
t0 = 2454964.57375
folded_lc = lc.fold(period=period, epoch_time=t0)

<h1>3. Vykreslení výsledného tranzitu</h1>
plt.figure(figsize=(10, 5))
folded_lc.scatter(color="royalblue", s=2, alpha=0.6, label="Měření družice Kepler")
plt.xlim(-0.1, 0.1)
plt.title("Tranzit první potvrzené kamenné exoplanety Kepler-10b")
plt.xlabel("Orbitální fáze [dny]")
plt.ylabel("Normalizovaný jas")
plt.legend()
plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.5)
plt.show()
```

Přímo před vámi se objeví charakteristické věčko tranzitu – reálný důkaz existence cizí kamenné planety obíhající kolem hvězdy vzdálené 560 světelných let od nás!

Dodatek A: Malý průvodce astronomickými jednotkami a pojmy

V astronomii a astroinformatice se setkáváme s jednotkami a pojmy, které nemají v běžném pozemském životě obdoby. Tento přehled slouží jako rychlý tahák.

Jednotka / Pojem	Zkratka	Fyzikální význam a přepočet	Příklad použití v datech
Astronomická jednotka	AU	149 597 870,7 km (střední vzdálenost Země–Slunce)	Vzdálenosti planet a komet ve Sluneční soustavě
Světelný rok	ly	$9,461 \cdot 10^{12}$ km (63 241 AU)	Vzdálenosti nejbližších hvězd (Proxima Centauri: 4,24 ly)
Parsek	pc	$3,26 \text{ ly} = 206\,265 \text{ AU} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ km}$	Základní astrofyzikální jednotka (paralaxa jedné úhlové vteřiny)
Úhlová vteřina	" (arcsec)	$1^\circ / 3\,600 = 1 / 206\,265 \text{ rad}$	Rozlišení dalekohledů, měřítko pixelu (např. $0,2''/\text{pix}$)
Magnituda	mag nebo m	Logaritmická míra jasů ($m = -2,5 \log_{10} F + C$)	Jasnost hvězd (menší číslo = jasnější objekt)
ADU	ADU	Analog-to-Digital Unit (digitální krok v paměti čipu)	Hodnoty v matici FITS souboru před kalibrací
Jansky	Jy	$10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$	Hustota toku záření v rádiové a infračervené astronomii
Juliánské datum	JD	Spojitě počítání dnů od 1. ledna 4713 př. n. l.	Časová osa světelných křivek bez přestupných roků

Dodatek B: Seznam nejlepších volně dostupných nástrojů pro astroinformatiku

Moderní astroinformatika stojí na otevřeném softwaru (Open Source). Tyto nástroje si můžete zdarma stáhnout a začít s nimi pracovat:

1. **Aladin Sky Atlas (CDS Štrasburk):** * *Platforma:* Windows, macOS, Linux, Web. * *Využití:* Interaktivní prohlížení celé oblohy, stahování FITS snímků, prolínání různých vlnových délek a dotazování v katalogích. * *Web:* ``aladin.cds.unistra.fr``
1. **SAOImage DS9 (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics):** * *Platforma:* Windows, macOS, Linux. * *Využití:* Celosvětový standard pro profesionální prohlížení FITS souborů, zkoumání WCS souřadnic, kreslení apertur a analýzu řezů obrazu. * *Web:* ``ds9.si.edu``
1. **TOPCAT (Tool for OPERations on Catalogues And Tables):** * *Platforma:* Java (jakýkoliv OS). * *Využití:* Neuvěřitelně rychlý nástroj pro práci s obřími tabulkami (miliony řádků), křížové porovnávání katalogů (cross-match) a vykreslování 2D/3D grafů. * *Web:* ``www.star.bristol.ac.uk/~mbt/topcat/``
1. **Knihovna AstroPy (Python):** * *Instalace:* ``pip install astropy`` * *Využití:* Oficiální vědecký balíček pro práci s FITS, souřadnicemi, jednotkami a kosmologickými modely v Pythonu. * *Web:* ``www.astropy.org``
1. **Knihovna Lightkurve (Python):** * *Instalace:* ``pip install lightkurve`` * *Využití:* Specializovaná knihovna pro stahování a analýzu světelných křivek z misí Kepler a TESS. * *Web:* ``lightkurve.keplerscience.org``

Dodatek C: Deset velkých astronomických objevů, které umožnila analýza dat

Počítače a algoritmy nestojí pouze v pozadí – samy stály u zrodu největších objevů moderní vědy:

1. **1967 – Objev prvního pulzaru (Jocelyn Bell Burnell):** Analýza kilometrů papírových záznamů rádiového dalekohledu odhalila nečekaně pravidelný pulzující signál (1,337 s), který vedl k objevu rotujících neutronových hvězd.
2. **1992 – Objev Kuiperova pásu (Jewitt & Luu):** Automatické blikání a porovnávání digitálních CCD snímků umožnilo objevit první těleso za drahou Neptuna (1992 QB1).
3. **1995 – První exoplaneta u hvězdy hlavní posloupnosti (Mayor & Queloz):** Objev planety 51 Pegasi b pomocí počítačové křížové korelace spekter a měření radiálních rychlostí (Nobelova cena za fyziku 2019).
4. **1998 – Objev zrychlujícího se rozpínání vesmíru (Perlmutter, Riess, Schmidt):** Automatizované porovnávání tisíců snímků vzdálených supernov typu Ia vedlo k objevu temné energie (Nobelova cena 2011).
5. **2005 – Objev trpasličí planety Eris (Mike Brown):** Počítačový algoritmus prohledávající snímky z observatoře Palomar odhalil těleso hmotnější než Pluto, což vedlo k nové definici pojmu planeta.
6. **2015 – První přímá detekce gravitačních vln (LIGO/Virgo):** Objev srážky dvou černých děr (GW150914) byl možný pouze díky srovnávání signálu v reálném čase s tisíci předpočítanými relativistickými šablonami v superpočítači (Nobelova cena 2017).
7. **2016 – Objev Proximy b v projektu Pale Red Dot:** Objev nejbližší exoplanety u hvězdy Proxima Centauri byl vyřešen pomocí pokročilých bayesovských statistických metod v časových řadách.
8. **2017 – Objev prvního mezihvězdného poutníka 'Oumuamua:** Přehlídkový systém Pan-STARRS na Havaji automaticky detekoval neobvykle rychlý objekt na hyperbolické trajektorii z mezihvězdného prostoru.
9. **2019 – První snímek stínu černé díry (Event Horizon Telescope):** Snímek supermasivní černé díry v galaxii M87 nevznikl v jediném dalekohledu – vznikl složením petabajtů dat z radioteleskopů po celé zeměkouli pomocí algoritmů syntetické interferometrie.
10. **2020 – Rekonstrukce historie Mléčné dráhy z dat Gaia:** Shlukové algoritmy strojového učení odhalily, že naše Galaxie se před 10 miliardami let srazila s jinou galaxií (Gaia-Enceladus), jejíž pozůstatky dodnes obíhají v galaktickém halu.

Dodatek D: Encyklopedický glosář základních pojmů astroinformatiky

- **ADU (Analog-to-Digital Unit):** Číslo zaznamenané převodníkem senzoru, které vyjadřuje elektrický náboj v daném pixelu. Pro převod na skutečný počet elektronů se násobí ziskem (Gain).
- **Apertura:** Pomyslná kruhová nebo eliptická oblast na snímku, uvnitř které se sčítají hodnoty pixelů pro změření celkového jasu hvězdy.
- **AstroPy:** Základní komunitní knihovna programovacího jazyka Python pro astrofyzikální výpočty a manipulaci s daty.
- **Bias Frame (Nulový snímek):** Kalibrační snímek pořízený s nulovou délkou expozice v úplné tmě, sloužící k odstranění čtecího šumu a napěťového posunu elektroniky.
- **Dark Frame (Temný snímek):** Kalibrační snímek pořízený se zavřenou závěrkou při stejné délce expozice a teplotě jako vědecký snímek, sloužící k odečtení tepelného šumu čipu.
- **FITS (Flexible Image Transport System):** Mezinárodní standardní formát pro ukládání astronomických snímků, spekter a tabulek včetně bohatých metadat v hlavičce.
- **Flat Field:** Kalibrační snímek rovnoměrně osvětlené bílé plochy sloužící ke korekci vinětace optiky a prachových stínů na senzoru.
- **Fotometrie:** Astronomická disciplína zabývající se přesným měřením množství záření (fotonického toku) přicházejícího z kosmických těles.
- **Kvantová účinnost (QE – Quantum Efficiency):** Procento dopadajících fotonů, které polovodičový detektor dokáže proměnit na volné elektrony. Moderní astronomické senzory dosahují QE přes 85–90 %.
- **L.A.Cosmic:** Specializovaný algoritmus založený na laplaciánu, který automaticky detekuje a odstraňuje ostré stopy kosmického záření z astronomických snímků.
- **Lombův–Scargleův periodogram:** Matematický algoritmus umožňující hledat periodické signály v nerovnoměrně vzorkovaných časových řadách.
- **PSF (Point Spread Function):** Bodová funkce odezvy; obraz dokonalého bodového zdroje (hvězdy) na detektoru po průchodu optikou a atmosférou.
- **Redukce dat:** Proces čištění surových pozorovacích dat od instrumentálních a atmosférických vlivů (odečtení biasu, temného proudu a dělení flat-fieldem).
- **Spektroskopie:** Rozklad elektromagnetického záření podle vlnových délek a studium absorpčních a emisních čar, které prozrazují chemické složení, teplotu a rychlost objektů.
- **Světelná křivka (Light Curve):** Časová řada zobrazující změnu jasnosti kosmického objektu v závislosti na čase.

- **Tranzit:** Přejít menšího kosmického tělesa (např. exoplanety) před diskem většího tělesa (hvězdy), projevující se drobným periodickým poklesem jasů.
- **WCS (World Coordinate System):** Mezinárodní matematický standard pro popis vztahu mezi souřadnicemi pixelů na čipu (x, y) a skutečnými nebeskými souřadnicemi (α, δ) .